

ANGEWANDTE SYSTEMANALYSE IM RAHMEN DES ÖSTERREICHISCHEN EUTROPHIEPROGRAMMS, PROJEKT SALZKAMMERGUTSEEEN

Kurt FEDRA

1. Summary

A stochastic approach to the dynamic modeling of the Attersee is introduced. Basically, using IMBODEN's phosphorus model SEEMOD 2, the influence of the phosphorus loading from the Mondsee discharge on the trophic state of the Attersee, defined as primary production per unit lake area ΣP_p , is studied. According to the typically high uncertainty in the data base and consequently also in the model parameters resulting from standard calibration techniques, a stochastic approach is chosen. A semiquantitative definition of the problem-defining "typical systems behaviour" is given, incorporating data uncertainty and the stochastic variability in almost five years of field observations. The parameter space, defined by the ranges of the parameters for the simulation model where based on Attersee field data as well as on literature values, is then explored by Monte Carlo techniques. Referring to the problem-defining systems behaviour, a behavioural classification of different regions of the parameter space is made. The analysis of the parameter space is a kind of sensitivity analysis, where emphasis is put on parameter combinations and their interdependencies. The conclusions from the analysis should allow one to judge model adequacy, further data requirements, and thus possible improvements in the field research strategies. It could also possibly lead to careful and critical predictions on the lake's response to changes in the Mondsee discharge.

2. Einleitung

Die Fragestellung nach dem Einfluß des Mondseeeinrinnns auf den trophischen Zustand des Attersees soll über stochastische Simulation und Sensitivity Analyse unter Verwendung eines einfachen Phosphor-Modells (SEEMOD 2, D. M. IMBODEN) analysiert werden.

Für die Auswirkungen des Mondsee- Ausrinns über die Mondseeache auf den Trophiezustand des Attersees müssen sicherlich zahlreiche, zumeist miteinander in Wechselwirkung stehende Faktoren in Betracht gezogen werden, wie zB. absolute und relative (im Verhältnis zu den übrigen Einfuhren sowie zu den entsprechenden Attersee-Konzentrations- und Inhaltswerten) Nährstoffzufuhren aus der Mondseeache, die Prozesse der räumlichen, insbesondere vertikalen Verteilung, die Sedimentation, Remineralisation und nicht zuletzt die Einbeziehung in den Nährstoffkreislauf bzw. die Produktionsdynamik des Sees, jeweils abhängig von zahlreichen physikalisch-chemischen Faktoren wie hydraulischer Belastung, Strahlung, Temperatur etc...

Zur Analyse dieser bereits in so vereinfachender Darstellung komplexen Zusammenhänge, insbesondere wenn quantitative Aussagen erreicht werden sollen, können Methoden der angewandten Systemanalyse, in erster Linie die dynamische Simulation, verwendet werden.

Ein entsprechendes dynamisches Simulationsmodell muß einerseits die problembestimmenden Variablen und Prozesse beinhalten bzw. beschreiben, andererseits in seiner Komplexität und seinem Datenbedarf der vorhandenen Information angepaßt sein. Für die hier dargelegte Studie ist außerdem zu berücksichtigen, daß aus finanziellen Gründen eine zeitliche Beschränkung der Arbeiten auf drei Monate erfolgen mußte. Das vorgelegte Programm ist daher nur als eine erste, entsprechend einfache Vorstudie zu verstehen.

3. Das Simulationsprogramm

Unter Berücksichtigung der oben angeführten Kriterien, insbesondere der sich aus dem teilweise (für diesen Zweck)

unzureichendem Datenvolumen ergebenden Notwendigkeit eines stochastischen Ansatzes, wurde das Simulationsmodell SEEMOD 2 (IMBODEN und GÄCHTER, 1978), entwickelt an der EAWAG, ausgewählt und am IIASA Computer implementiert.

Das Modell ist ein dynamisches, eindimensionales, vertikales Diffusionsmodell, das sich auf die Darstellung der beiden Systemvariablen Phosphat (OP) und partikulärer Phosphor (PP) beschränkt. Primärproduktion pro Flächeneinheit (ΣPP) als Maß für den Trophiegrad, wird in einer nichtlinearen Funktion von OP und PP unter Verwendung der Michaelis-Menten Formulierung für die Nährstoffaufnahme und der Berücksichtigung der Selbstbeschattung der Algen beschrieben. Weiters berücksichtigt das Modell die See- Geometrie, hydraulische Belastung, Einfuhren von OP und PP, Respiration/ Remineralisation, das Absinken der Sprungschicht im Sommerhalbjahr, vertikale Eddy-Diffusion und den Phosphor- Austausch zwischen Sediment und Wasser. Das Modell geht von einem vollständig durchmischten Epilimnion aus; unterhalb der Thermokline werden die Phosphorfraktionen (OP) und (PP) als Funktionen der Tiefe durch partielle Differentialgleichungen zweiter Ordnung beschrieben (Abbildung 1).

4. Das stochastische Rahmenprogramm

Die zur Kalibrierung des Modells, dh. zu seiner Anpassung an einen gegebenen See, üblicherweise benützten Verfahren verwenden, ausgehend von ersten Näherungswerten für die Modell- Parameter, Meßdaten- Zeitserien der Systemvariablen (hier OP und PP), an die das Modellverhalten in einem Optimierungsverfahren durch Veränderung der Parameter angepaßt wird. Im vorliegenden Fall stößt diese Methode jedoch auf Schwierigkeiten, die sowohl in

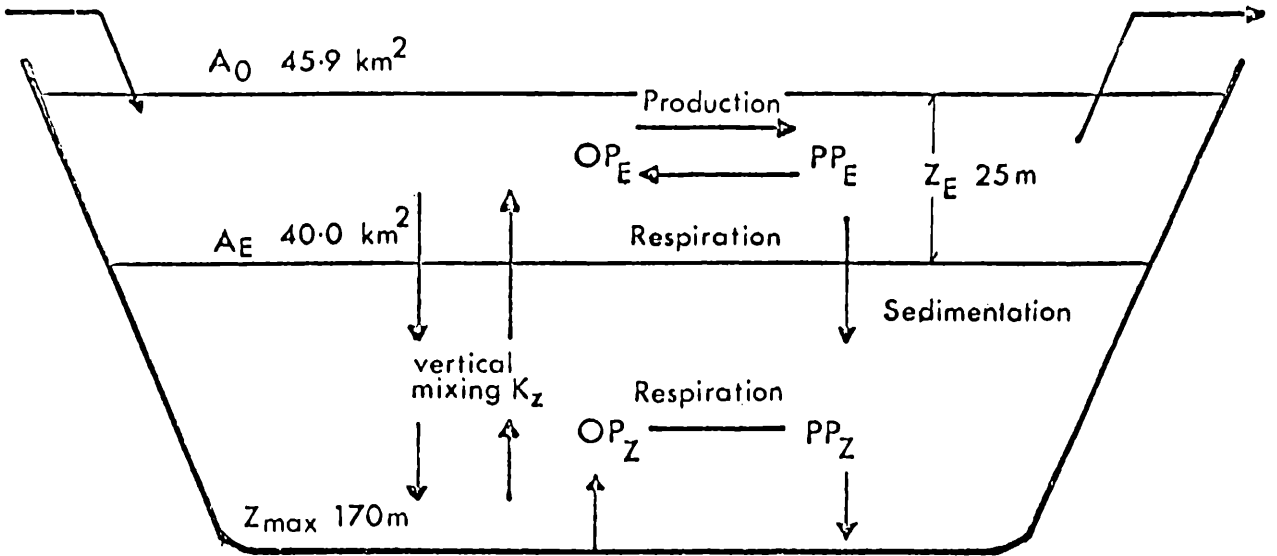


Abbildung 1

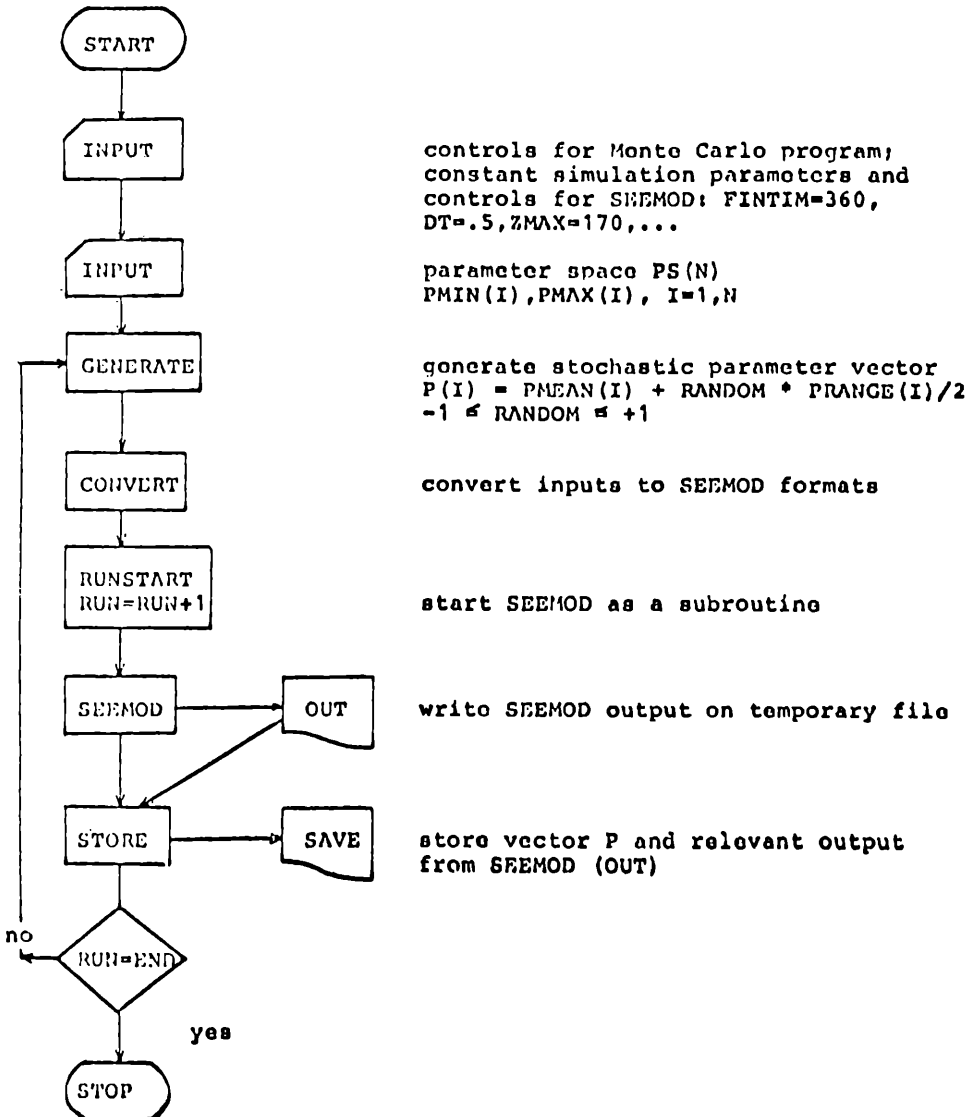


Abbildung 2

Abbildung 1: Schematische Darstellung des Phosphor-Modells SEEMOD 2 mit den verwendeten See- Parametern (nach IMBODEN und GÄCHTER, 1978)

Schematic repräsentation of the phosphorus-model SEEMOD 2, indicating the lake parameters used (after IMBODEN and GÄCHTER, 1978)

Abbildung 2: Flußdiagramm des stochstischen Simulationsmodells

Flow diagram of the stochastic simulation model

N	symbol	PMIN(i)	PMAX(i)	unit	name/explanation
1	Km	.2	2.0	mg/m ³	Michaelis constant
2	Re	.02	.2	day ⁻¹	Resp./Mineralization epilimnion
3	Rh	.01	.05	day ⁻¹	Resp./Mineralization hypolimnion
4	Ge	.02	1.0	m*day ⁻¹	net sedimentation velocity (epi.)
5	Gh	.05	2.0	m*day ⁻¹	net sedimentation velocity (hypo.)
6	μ_{min}	.1	.3	day ⁻¹	minimum production rate
7	μ_{max}	1.0	3.0	day ⁻¹	maximum production rate
8	DeltaT*	180	270	day	time lag of maximum
9	KzH	.02	.5	cm ² *sec ⁻¹	diffusion coefficient (hypo.) **
10	KzT	.01	.25	cm ² *sec ⁻¹	diffusion coefficient (thermocline) **
11	ξ_0	.2	.4	m ⁻¹	extinction coefficient
12	η	.01	.02	m ² *mg ⁻¹	self shading coefficient
13	Zstart	3.0	6.0	m	initial thermocline depth
14	Zend	15.0	20.0	m	final thermocline depth
15	Tstart*	120	180	day	begin of stratified period
16	Tend*	280	330	day	end of stratified period
17	ZT	5.0	10.0	m	thickness of thermocline
18	QOP	.01	.2	mg*m ⁻² *day ⁻¹	orthophosphate input **
19	QPP	.25	1.5	mg*m ⁻² *day ⁻¹	particulate phosphorous input **
20	Q	.02	.05	m*day ⁻¹	hydraulic loading **
21	COP	.2	2.0	mg*m ⁻³	initial [OP] conc. (mixed period)
22	CPP	2.5	7.5	mg*m ⁻³	initial [PP] conc. (mixed period)

* time relative to January 1st

** assumed constant, when no distinct pattern could be seen in the data

Tabelle 1: Parameter, Maximal und Minimalwerte

aufsammlungs- wie meßtechnischen Problemen (wie etwa beim OP, dessen Konzentration in der Regel um die Nachweisbarkeitsgrenze liegt), als auch in prinzipiellen Bereichen, nämlich der hohen Variabilität ökologischer Daten (bedingt durch zahlreiche stochastische Faktoren, räumliche Heterogenitäten, funktionelle Unterschiede innerhalb als einheitlich betrachteter Elemente etc) begründet liegen:

Die vorhandenen, zur Kalibrierung des Modells notwendigen Daten zeigen sehr hohe Streuungen und weite, meist nur indirekt abzuschätzende Vertrauensgrenzen, besonders, wenn man mehrere aufeinanderfolgende Jahre betrachtet. Darüber hinaus sind auch die üblicherweise als ausreichend bekannt angenommenen Anfangsbedingungen (hier OP und PP- Konzentrationen während der durchmischten Phase) sowie die inputs mit einer der Natur der Variablen sowie der Methodik der Probennahme entsprechenden Unschärfe behaftet.

Außerdem verwendet das Modell neben den stark aggregierten Variablen auch entsprechend aggregierte Parameter (wie etwa die Produktionsrate μ), die nicht mehr unmittelbar aus experimentellen Daten oder Meßdaten abgeleitet werden können.

Aus den oben angeführten Gründen erscheint der Versuch einer deterministischen Kalibrierung des Modells nicht sinnvoll. Als Lösung dieses keineswegs für den Attersee, sondern für komplexe ökologische Systeme allgemein wesentlichen Problems soll ein stochastisches Verfahren zur Simulation komplexer, schlecht definierter Systeme herangezogen werden (vgl. SPEAR and HORNBERGER 1978, TIWARI et al. 1978) (Abbildung 2).

Das Verfahren geht von zwei wesentlichen Grundannahmen aus:

1. daß ein im Sinne der Fragestellung "typisches Systemverhalten" mit Hilfe der vorhandenen Daten definiert werden kann;

2. daß für die im Modell verwendeten Parameterwerte anstelle eindeutiger Einzelwerte sinnvoll begrenzbare Bereiche festgelegt werden können (vgl. Tabelle 1).

ad 1. Die Definition eines "typischen Systemverhaltens" für den Jahreszyklus erfolgt in einer Reihe semi-quantitativer, relativistischer Sätze. Sie berücksichtigt die Variabilität des Systemverhaltens in unterschiedlichen Jahren, ausgehend von möglichst langjährigen Beobachtungsreihen, unter der grundsätzlichen Annahme von steady state Bedingungen (zumindest in Relation zur Meßgenauigkeit), sowie die in den Meßreihen selbst enthaltenen Unschärfen. Beispiele für Sätze zur Definition eines "typischen Attersee- Jahres" unter Verwendung der Zustandsgrößen des Modells wären:

- a) Das Maximum der epilimnischen PP- Konzentration liegt im Zeitraum März bis Juni.
- b) Das Maximum der PP- Konzentration muß das Doppelte des Minimums überschreiten.
- c) Das Maximum darf einen Wert von 15 mg PP/m^3 nicht überschreiten.
- d) Die Gesamtphosphor- Ausfuhr muß im Bereich zwischen 3 und 10 t/ Jahr liegen.
- e) Die Jahresprimärproduktion muß im Bereich von 50 bis 150 gC/m^2 liegen.
- f) Die OP- Konzentration darf in der Durchmischungsphase den Wert von 2 mg OP/m^3 nicht überschreiten.

ad 2. Der Begriff Parameter im Sinne der zweiten Voraussetzung beinhaltet sowohl interne Parameter, also Modellparameter im engeren Sinn, als auch die Anfangsbedingungen sowie Hilfsparameter, mit deren Hilfe die (zum Teil zeitlich veränderlichen) Inputs beschrieben werden. Die

Verwendung dieser Hilfsparameter reduziert die Zahl der Eingabewerte, die für das Modell ursprünglich in tabellarischer Form (Zeitpunkt, Meßwert) durch lineare Interpolation ermittelt werden. Zur Illustration etwa die Produktionsrate μ , die anstelle von Wertepaaren (Zeit, Wert) mit den Parametern μ_{\max} , μ_{\min} und Δt (Zeitverschiebung des Maximums gegenüber der Startzeit der Simulation) mit Hilfe einer Sinusfunktion beschrieben wird. Der Parameterbegriff umschließt damit den gesamten Datenbedarf des Modells mit Ausnahme der eindeutigen Größen wie Seetiefe, Oberfläche und den Simulationsparametern wie Simulationsdauer, Integrationsschritt, Ausgabeintervall etc.

Diese N Parameter (im vorliegenden Fall $N = 22$) können nun als die N Dimensionen eines Parameterraumes $PS(N)$ betrachtet werden, der durch den Bereich der einzelnen Parameter ($PRANGE(i)$), beschrieben durch Maximal- und Minimalwerte ($PMAX(i)$, $PMIN(i)$), begrenzt wird (Tabelle 1). Aus diesem Parameterraum werden nun durch ein stochastisches Verfahren (Monte Carlo- Verfahren) Parametervektoren ($P(N)$) realisiert und jeweils einem Simulationslauf zugrunde gelegt (Abbildung 2). Das Monte Carlo- Verfahren generiert unabhängige Parameterkombinationen aus den jeweiligen Bereichen ($PRANGE(i)$) unter der Annahme gleichmäßiger Verteilung innerhalb dieser Bereiche. Die Verwendung gleichmäßiger (rechteckiger) Verteilungen soll die möglichst gleichmäßige Repräsentation des Parameterraumes bei einer hohen Zahl von Simulationsläufen (geplant sind bis zu 1000 Simulationen) ohne Konzentration in bestimmten Regionen sicherstellen. Außerdem fehlt in den meisten Fällen die zur Festlegung einer anderen Verteilungsform (etwa Gauß- Verteilung) notwendige statistische Information.

Die mit den einzelnen Parametervektoren erzielten Modellverhalten werden nun im Sinne der Definition des typischen Systemverhaltens als typisch (realistisch) oder atypisch (unrealistisch) bewertet; die Analyse der Parameterregionen, die nun typisches Systemverhalten erzeugen bzw. nicht erzeugen, kann nun Aufschluß geben über:

- a) die Brauchbarkeit des Modells für das gegebene System; Hinweise können hier aus der Eindeutigkeit der Parameterraum- Auftrennung sowie der physikalisch-chemischen bzw. ökologischen Plausibilität der Parameterkombinationen (soweit sie direkt physikalisch interpretierbar sind) gewonnen werden.
- b) die Modellsensitivität gegenüber einzelnen Parametern, verdeutlicht durch die normalisierte Größe der typischen Systemverhalten zugrunde liegenden Parameterbereiche sowie die Sensitivität gegenüber Parameterkombinationen. Besonderes Augenmerk gilt hier den im Sinne der Fragestellung bedeutenden Parametern (dh. die der Mondseeache zuzuschreibenden Anteile der Phosphor- Einfuhren und die Relation von DP und PP in diesen Einfuhren) sowie ihrer Abhängigkeit von anderen Parametern.
- c) eventuell mögliche Verbesserungen im Untersuchungsprogramm, indem besonders "kritische" Parameter aus b) deutlich gemacht werden, auf die nun die Untersuchungen konzentriert werden sollten.

Ausgehend von dem über die Analyse ermittelten Parameter- raum und dessen eventueller weiterer Präzisierung durch gezielte Felduntersuchungen können nun bei vorsichtig- kritischer Übertragung des Modellverhaltens auf das untersuchte System Auswirkungen von Veränderungen im

Sinne von Management- Alternativen unter Berücksichtigung der natürlichen stochastischen Variabilität der Inputs und des Systemverhaltens weiter untersucht werden.

5. Literatur

- IMBODEN D. M. and R. GÄCHTER, 1978, A dynamic lake model for trophic state prediction, Ecol. Modelling 4, 77 - 98
- SPEAR R. C. and G. M. HORNBERGER, 1978, Eutrophication in Peel Inlet: An analysis of behaviour and sensitivity of a poorly- defined system, CRES Report AS/ P24
- TIWARI J. L., J. E. HOBBIIE, J. P. REED, D. W. STANLEY and M. C. MILLER, 1978, Some stochastic differential equation models of an aquatic ecosystem, Ecol. Modelling 4, 3 - 27

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Arbeiten aus dem Labor Weyregg](#)

Jahr/Year: 1979

Band/Volume: [3_1979](#)

Autor(en)/Author(s): Fedra Kurt

Artikel/Article: [ANGEWANDTE SYSTEMANALYSE IM RAHMEN DES
ÖSTERREICHISCHEN EUTROPHIEPROGRAMMS, PROJEKT
SALZKAMMERGUTSEEN 121-130](#)